

Анализ отказоустойчивости датчиковых и интеллектуальных систем мониторинга температур тормозов автомобилей

С.Е. Бузников, Д.С. Елкин, Н.С. Шабанов
Кафедра «Управление и информатика в технических системах»
Московский государственный институт электроники и математики
(технический университет)
E-mail: inkaplus@yandex.ru, тел.: 916-88-49.

Наиболее перспективным направлением решения проблемы безопасности дорожного движения для автомобильного транспорта является создание систем активной безопасности и оснащение ими действующего парка автомобилей [1]. Одним из важнейших показателей для таких систем является отказоустойчивость, как свойство системы сохранять функции управления после отказа некоторых ее элементов.

В мировой практике существует два основных направления повышения отказоустойчивости – аппаратное и информационное резервирование. Возможность и целесообразность применения какого-либо способа во многом определяется схемой построения системы.

В системах, построенных по классическим датчиковым схемам, в которых каждому измеряемому параметру соответствует датчик первичной информации, как правило, применяется аппаратное резервирование. Этот путь неизбежно ведет к ухудшению практически всех системных показателей, в частности, к увеличению общей стоимости системы, затрат на установку, инструментальную настройку и техническое обслуживание.

Интеллектуальные системы, использующие математические модели и алгоритмы косвенных измерений, могут выполняться в минимальной конфигурации технических средств. Использование в интеллектуальных системах активной безопасности знаний об объекте управления в виде формализованных описаний его свойств позволяет создавать информационную избыточность для значимых переменных решаемых задач, которая собственно и используется для информационного резервирования. В этом случае повышение отказоустойчивости происходит без увеличения количества датчиков первичной информации, т.е. исключаются многие проблемы, присущие аппаратному резервированию.

Задачи предотвращения типовых столкновений, которые решаются системами активной безопасности, сводятся к задаче динамической стабилизации координат состояния управляемого объекта в области, ограниченной переменными верхними и нижними границами. Для решения подобных задач требуется не только формирование оценок координат состояния, но и их верхних и нижних границ. Классические датчиковые системы,

в которых не предусмотрено определение верхних и нижних динамических границ координат состояний, не позволяют корректно решать рассматриваемую задачу.

Сравнительный анализ свойств датчиковых и интеллектуальных систем приведен в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики датчиковых и интеллектуальных систем

№ п/п	Системные характеристики	Датчиковые системы	Интеллектуальные системы
1.	Наращивание функций	Дополнительные датчики информации	Дополнительные программные средства
2.	Уровень ошибок мониторинга	Определяется классом точности датчиков	Определяется уровнем адекватности моделей и возможностями алгоритмов
3.	Отказоустойчивость	Аппаратное резервирование	Информационное резервирование
4.	Затраты на техническое обслуживание	Диагностика, замена и настройка датчиков	Практически не требуются
5.	Потребляемая мощность	Возрастает с увеличением числа датчиков	Минимальна, не меняется
6.	Влияние реальных факторов	Увеличивается с числом датчиков	Минимально
7.	Влияние на смежные системы	Проявляется в случае коротких замыканий в общих цепях питания	Минимально в случае отсутствия общих цепей питания
8.	Ограничения на установку	Жёстко определяются конструкцией объекта	Практически отсутствуют
9.	Общая стоимость	Растет с увеличением числа датчиков	Минимальна

Целью исследования является анализ свойств отказоустойчивости датчиковых и интеллектуальных систем на примере задач мониторинга температур тормозов легкового автомобиля, а также оценка уровня ошибок мониторинга температур по экспериментальным данным косвенных измерений для реального объекта.

Для объективного оценивания свойства отказоустойчивости используется следующий показатель:

$$Q = \sum_{i=1}^N f_i(c_i) \cdot (f_{max} \cdot N)^{-1}, \text{ где} \quad (1)$$

$f_i(c_i)$ – число функций, правильно выполняемых системой активной безопасности в состоянии c_i (например, в случае отказа одного или нескольких датчиков первичной информации); f_{max} – число функций, которые выполняет полностью исправная система; N – количество возможных состояний систем.

В качестве примера реализации информационного резервирования в интеллектуальной системе активной безопасности ниже рассмотрен способ достраивания оценок температур перегрева тормозов ненаблюдаемых колес автомобиля.

Математическая модель нагрева тормозов – система уравнений первого закона термодинамики в дифференциальной форме [2], которая решается в системе активной безопасности с помощью конечно-разностных уравнений в дискретном времени:

$$y_i^*(k) = D_{0i}^* \cdot y_i^*(k-1) + \Delta T (T_{Hi}^*)^{-1} D_{li}^* \cdot U_{3i}(k) \cdot \text{mod}\{V_i(k)\}, 1 \leq i \leq 4, \text{ где} \quad (2)$$

$$D_{0i}^* = (T_{Hi}^* - \Delta T)(T_{Hi}^*)^{-1}; \quad T_{Hi}^* = C_{Ti}^* (C_{0i}^*)^{-1}; \quad D_{li}^* = (C_{0i}^*)^{-1} \cdot k_{3i} \cdot R_{Ti} \cdot R_{ci}^{-1}.$$

Настройными параметрами для $1 \leq i \leq 4$ являются T_{Hi}^* – постоянная времени охлаждения i -го тормозного устройства; C_{Ti}^* – теплоемкость i -го тормозного устройства; k_{3i} – коэффициент усиления i -го тормоза; R_{Ti} – радиус i -го тормозного диска (барабана); R_{ci} – свободный радиус i -го колеса. Из настройных параметров C_{Ti}^* и T_{Hi}^* система активной безопасности также получает значение константы теплообмена i -го тормозного устройства C_{0i}^* . Нумерация колес автомобиля принята в соответствии со схемой рис. 1 и распространяется также на тормозные устройства и шины.

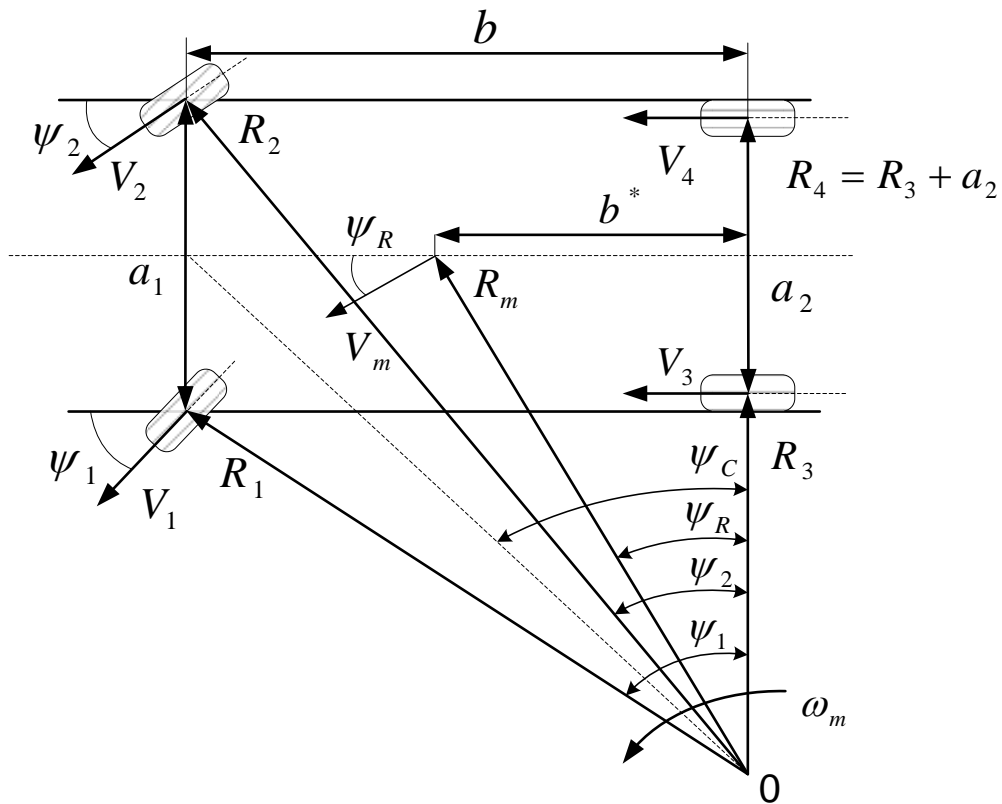


Рис. 1. Кинематическая схема движения легкового автомобиля на вираже.

Входными данными при использовании системы уравнений (2) являются управляющее тормозное воздействие $U_3(k)$, оценки которого рассматриваемая интеллектуальная система

активной безопасности формирует даже при одном рабочем датчике с помощью алгоритма идентификации состояния органов управления [3], и линейные скорости вращения колес.

Оценки \hat{V}_i система ИНКА-СПОРТ при всех исправных датчиках первичной информации формирует на основе измеряемых угловых скоростей вращения колес ω_i [4]. Информационное резервирование оценок \hat{V}_i для ненаблюдаемых колес основано на использовании системы уравнений линейных скоростей V_i вращения колес автомобиля на выраже при условии $\text{mod}\{\psi_c\} \ll 0.5$ рад:

$$\begin{cases} V_1 \cong V_m + 0.5a_1b^{-1}V_m\psi_c + \Delta V_{S1} + 0.5 \cdot a_1 \cdot \Delta\omega_m; \\ V_2 \cong V_m - 0.5a_1b^{-1}V_m\psi_c + \Delta V_{S2} - 0.5 \cdot a_1 \cdot \Delta\omega_m; \\ V_3 \cong V_m + 0.5a_2b^{-1}V_m\psi_c + \Delta V_{S3} + 0.5 \cdot a_2 \cdot \Delta\omega_m; \\ V_4 \cong V_m - 0.5a_2b^{-1}V_m\psi_c + \Delta V_{S4} - 0.5 \cdot a_2 \cdot \Delta\omega_m, \text{ где} \end{cases} \quad (3)$$

V_m – скорость движения центра масс автомобиля; a_1 и a_2 – размеры колеи соответственно передних и задних колес; b – база автомобиля; ψ_c – угол поворота управляемых колес; ΔV_{Si} – скорость продольного скольжения i -го колеса; $\Delta\omega_m$ – дополнительная угловая скорость вращения центра масс автомобиля в случае заноса или сноса колес.

Решение некорректной задачи определения оценок \hat{V}_m , $\hat{\psi}_c$, $\Delta\hat{V}_{Si}$ ($1 \leq i \leq 4$) и $\Delta\hat{\omega}_m$ по известным оценкам \hat{V}_i , $1 \leq i \leq 4$, настроечным параметрам a_1 , a_2 и b на основании (3) приведено в [5].

В неполной конфигурации измерительной части системы активной безопасности достраивание оценок $\Delta\hat{V}_{Si}$ и \hat{V}_i , $1 \leq i \leq 4$ выполняется на основании уравнений:

$$\begin{cases} \Delta\hat{V}_{Si} = \hat{S}_i \cdot \hat{V}_m; \\ \hat{V}_i = \hat{V}_m - 0.5 \cdot (-1)^i \cdot \hat{V}_m \cdot \hat{\psi}_c + \Delta\hat{V}_{Si}. \end{cases} \quad (4)$$

Адекватная оценка $\hat{\psi}_c$ формируется в случае поступления сигналов с датчиков разных бортов ($i, j = 1, 2; 3, 4; 1, 4; 3, 2$). Если работоспособным остается только один датчик частоты вращения колеса или датчики одного борта ($i, j = 1, 3; 2, 4$), то задается $\hat{\psi}_c = 0$, что совпадает с $\psi_c = 0$ на подавляющем большинстве временных интервалов движения в реальных условиях. Достраивание оценки \hat{V}_m в неполной конфигурации датчиков первичных измерений осуществляется аналогично достраиванию в полной конфигурации путем исключения оценок \hat{V}_i ненаблюдаемых колес.

Оценки скольжений ненаблюдаемых колес \hat{S}_i для использования в системе (4) определяются в результате решения обратной задачи идентификации коэффициентов k_{si} . Для решения этой задачи вводится допущение, что значения коэффициентов $k_{si}(S) = k_{sj}(S)$ для колес одного борта, а в случае отсутствия сигналов датчиков левого или правого бортов, вводится допущение о равенстве $k_{si}(S) = k_{sj}(S)$ для всех четырех колес. Данное допущение выполняется при использовании всех четырех шин одной марки и одного типоразмера при движении по однородной поверхности.

Типовые зависимости коэффициента трения скольжения k_s от величины скольжения S для колеса автомобиля приведены на рис 2.

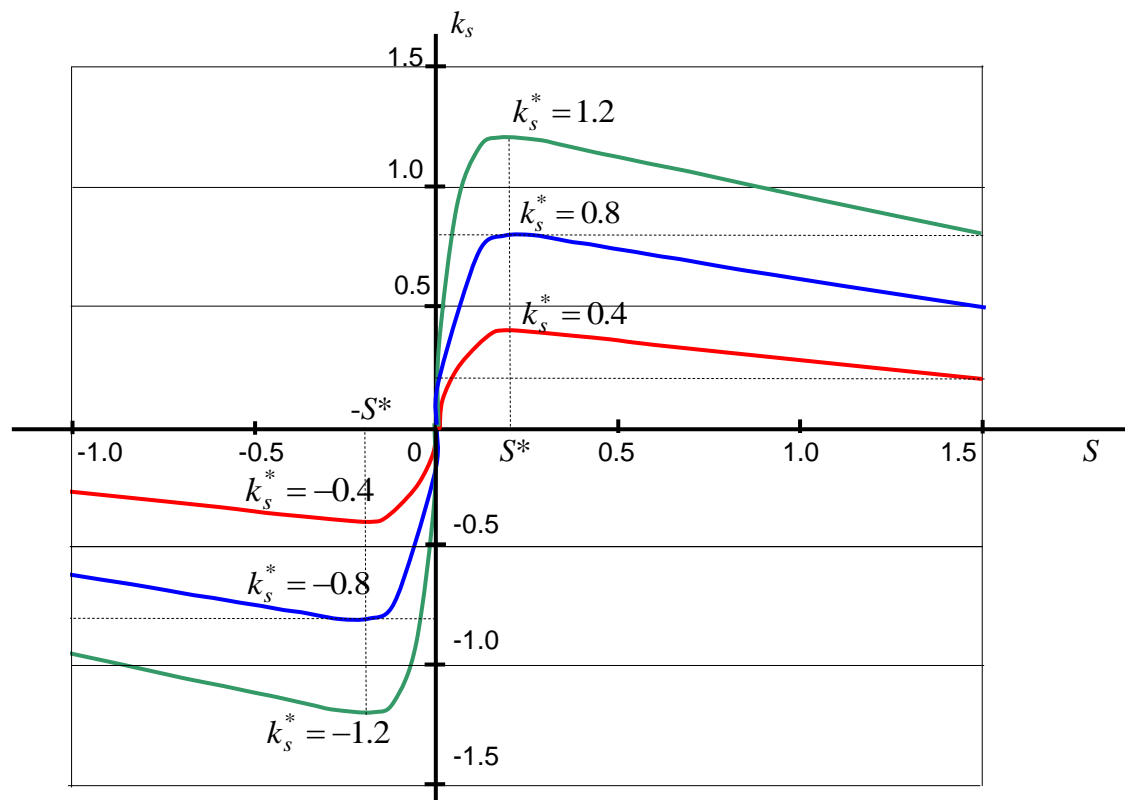


Рис. 2. Зависимость коэффициентов скольжения k_s от скольжения колеса S для трех типов поверхностей.

Зависимость $k_{si}(S_i)$ аппроксимируется кусочно-линейной функцией:

$$k_{si}(S_i) = \begin{cases} 0.25 \cdot k_{si}^*, & \text{если } |S_i| \leq 0.01; \\ k_{si}^* \cdot [0.25 + 5 \cdot |S_i|], & \text{если } 0.01 < |S_i| \leq 0.15; \\ k_{si}^*, & \text{если } 0.15 < |S_i| \leq 0.30; \\ \{1.10 - 0.3 \cdot |S_i|\} \cdot k_{si}^*, & \text{если } 0.3 < |S_i| \leq 3.0, \end{cases} \quad (5)$$

где его максимальное значение достигается в диапазоне скольжений от 0.15 до 0.3;

$S_i = \Delta V_{si} \cdot (V_m)^{-1}$ — скольжение i -го колеса. Данная аппроксимация является достаточно

близкой к истинной зависимости для типовых (сухой и мокрый асфальт, лед, снег) и смешанных поверхностей и имеет погрешности в пределах, допустимых для инженерных расчетов.

Идентификация зависимости $k_{Si}(S_i)$ для наблюдаемых колес приведена в [6]. Для ненаблюдаемых колес в соответствии с III законом Ньютона $F_{Si} = F_{dT}$, где F_{Si} – модуль силы трения скольжения, приложенной к i -му колесу, F_{dT} – модуль тягово-тормозной силы, приложенной к i -му колесу. Значения k_{Si} определяются в виде:

$$k_{Si} = \begin{cases} 0.5 \cdot M_{Si} \cdot a_{dT} \cdot m_0 \cdot F_{Ni}^{-1}, & \text{если } U_3 = 0; \\ k_{3i} \cdot U_3 \cdot F_{Ni}^{-1}, & \text{если } U_3 > 0, \text{ где} \end{cases} \quad (6)$$

F_{Ni} – нормальная составляющая динамической нагрузки на i -ое колесо;

a_{dT} – тягово-тормозное ускорение;

$$\begin{cases} M_{S1} = M_{S2} = 1, M_{S3} = M_{S4} = 0, & \text{если привод передний;} \\ M_{S1} = M_{S2} = 0, M_{S3} = M_{S4} = 1, & \text{если привод задний;} \\ M_{S1} = M_{S2} = M_{S3} = M_{S4} = 0.5, & \text{если привод полный.} \end{cases}$$

Идентификация скольжения S_i ненаблюдаемого i -го колеса осуществляется на основании (5) с использованием доопределяющих условий. Однозначное определение оценки \hat{S}_i возможно лишь на интервале скольжений $[-S_i^* \div S_i^*]$:

$$\hat{S}_i = \begin{cases} \text{sign}(a_{dT}) \cdot \tilde{S}_i, & \text{если } \tilde{S}_i \geq 0; \\ 0, & \text{если } \tilde{S}_i < 0, \text{ где} \end{cases} \quad (7)$$

$$\tilde{S}_i = 0.2 \cdot (k_{Si}^*)^{-1} [k_{Si} - 0.25 \cdot k_{Si}^*].$$

На рис. 3 приведены временные диаграммы оценок $\hat{V}_1(t)$ в условиях изменяющегося угла поворота управляемых колес ψ_c , полученные на реальном автомобиле с использованием системы активной безопасности ИНКА-СПОРТ [7] для случая наблюдаемого колеса и этого же ненаблюдаемого колеса (имитируется отсутствие сигнала с датчика). Бинарный признак $C_1 = 1$ соответствует работающему датчику частоты вращения первого колеса, $C_1 = 0$ – отсутствию сигнала датчика первичной информации того же колеса.

Анализ экспериментальных результатов показывает достаточно высокую сходимость оценок линейных скоростей вращения колес автомобиля для случаев полной и неполной конфигурации измерительной части системы активной безопасности ИНКА-СПОРТ, что свидетельствует об адекватности используемых математических моделей. Различия в оценках на малых скоростях объясняются конечным уровнем порога срабатывания датчиков индукционного типа.

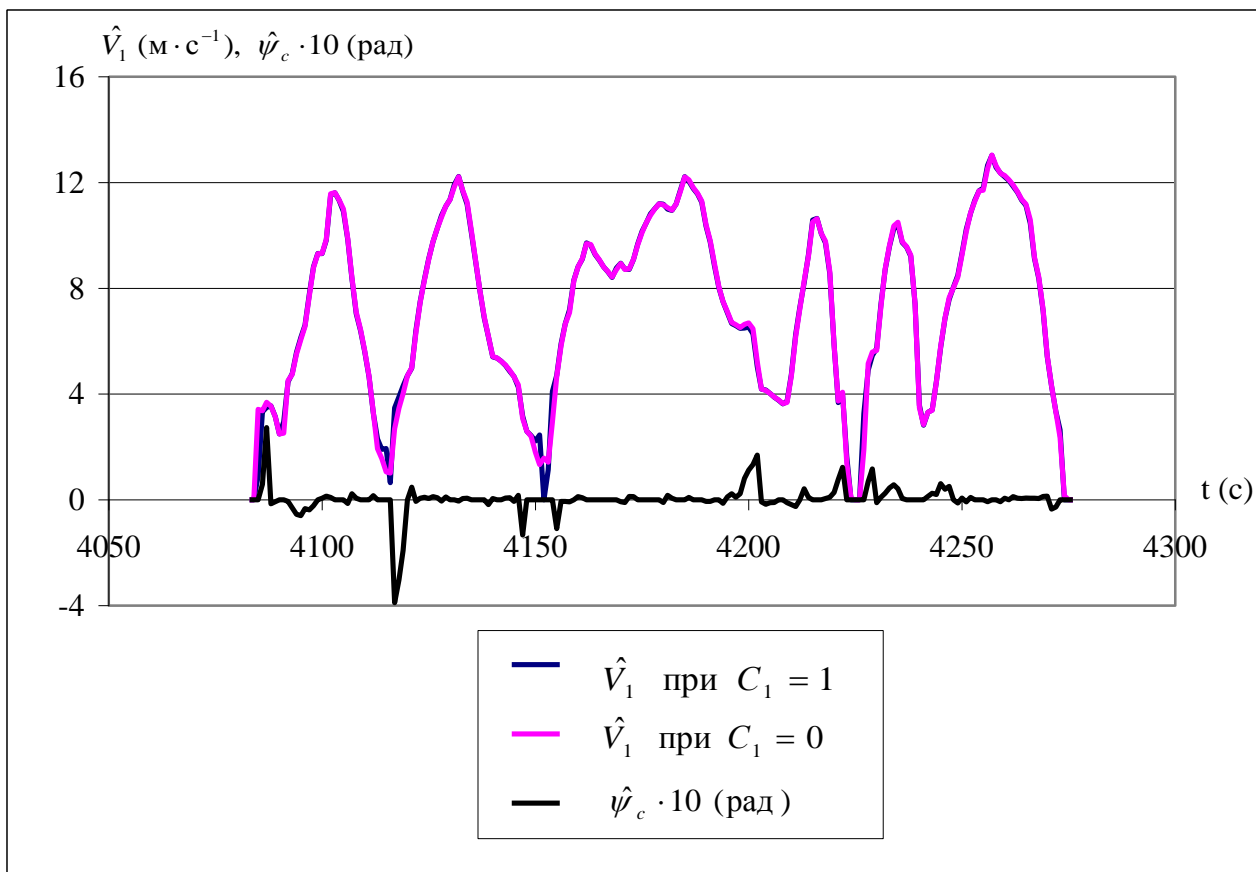


Рис. 3. Экспериментальные временные диаграммы оценок $\hat{V}_1(t)$.

На рис. 4 представлены экспериментальные временные диаграммы оценок температуры перегрева тормозного устройства первого колеса $\hat{y}_1^*(t)$, полученные на реальном автомобиле с использованием системы активной безопасности ИНКА-СПОРТ для описанного выше случая. На этом же рисунке для сравнения приведены отдельные измерения температуры \tilde{y}_1^* перегрева тормозного устройства, проведенные на остановках с помощью контактного термометра.

Уровень ошибок косвенных измерений температур перегрева тормозов не превышает 5%, что позволяет использовать получаемые оценки для решения задачи динамической стабилизации температур тормозов с «размытыми» нижними и верхними границами.

Анализ экспериментальных результатов показывает достаточно высокую сходимость оценок $\hat{y}_1^*(t)$ для случаев работающего датчика частоты вращения колеса и отсутствия сигналов с данного датчика, а также высокую сходимость получаемых оценок температур с непосредственными измерениями. Это свидетельствует, во-первых, о корректности используемого способа информационного резервирования, а, во-вторых, об адекватности используемой математической модели нагрева тормозов автомобиля.

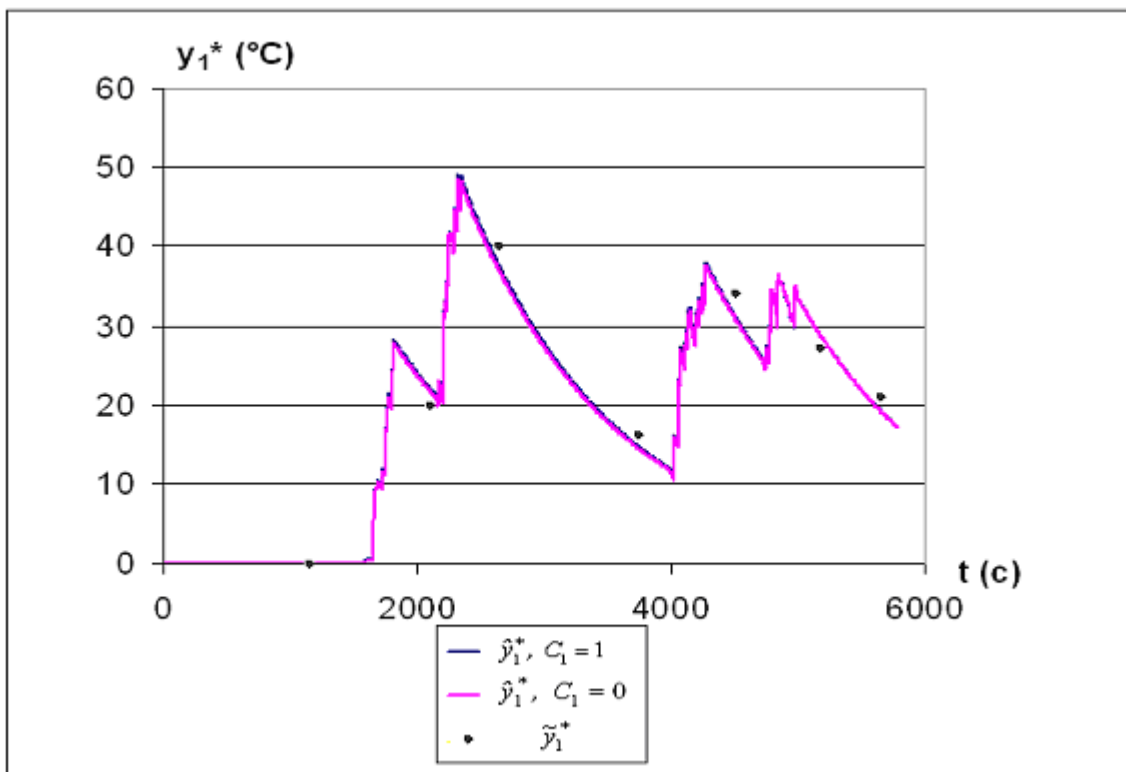


Рис. 4. Экспериментальные временные диаграммы $\hat{y}_1^*(t)$ с контрольными точками \tilde{y}_1^* .

Сравнительный анализ отказоустойчивости датчиковых и интеллектуальных систем основан на построении зависимостей объемов реализуемых функций от состояний систем, например, для задач мониторинга температур перегрева тормозов легкового автомобиля. В качестве датчиковых систем для построения диаграммы были рассмотрены современные зарубежные системы измерения температур нагрева тормозов, использующие штепсельные или трущиеся термопары [8, 9]. В качестве интеллектуальной системы была рассмотрена отечественная система активной безопасности ИНКА-СПОРТ, выполняющая, в числе прочего, функции мониторинга температур перегрева шин и тормозов автомобиля [5]. В отличие от датчиковых систем, которые используют специализированные датчики, ИНКА-СПОРТ использует датчики частот вращения колес индукционного типа.

На рис. 5 приведена диаграмма состояний датчиковой и интеллектуальной систем мониторинга температур нагрева тормозов. При использовании той или иной полностью исправной системы выполняется мониторинг температур перегрева тормозов для всех четырех колес.

Следующие четыре состояния на диаграмме c_2, c_3, c_4, c_5 характеризуются отказом одного из четырех колесных датчиков.

Состояния $c_6, c_7, c_8, c_9, c_{10}$ соответствуют двум работоспособным из четырех имеющихся датчиков; $c_{12}, c_{13}, c_{14}, c_{15}$ – одному работоспособному датчику.

Состояние c_{16} – полная деградация измерительной части системы.

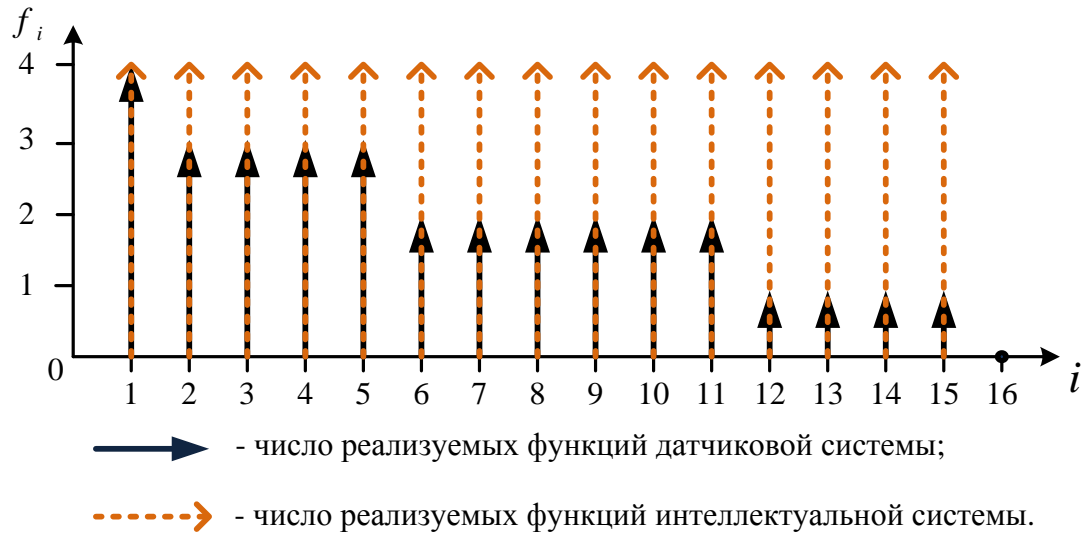


Рис. 5. Зависимость числа выполняемых функций от состояний системы.

Анализ диаграммы показывает, что система, построенная по классической датчиковой схеме, характеризуется уменьшением числа правильно выполняемых функций в условиях деградации измерительной части. Интеллектуальная система, напротив, может сохранять число правильно выполняемых функций вплоть до отказа последнего датчика. Отмеченное свойство выражается показателем отказоустойчивости (1). Так, в рассмотренном случае, для датчиковой системы $Q = 0.5$, а для интеллектуальной системы $Q = 0.94$.

Замечанием к рассмотренной диаграмме является отсутствие в рассмотренных состояниях состояний, соответствующих отказу бортового компьютера, который входит в названные системы, а для интеллектуальных систем является ключевым элементом. Данное допущение основано на том, что надежность современных зарубежных бортовых компьютеров на несколько порядков выше, чем надежность используемых датчиков первичной информации.

Анализ результатов проведенного исследования позволяет сформулировать следующие выводы:

– информационное резервирование значимых переменных задачи нагрева тормозов, достигаемое за счет введения дополнительных уравнений скоростей вращения колес на вираже и равновесия тягово-тормозных сил и сил трения скольжения, позволяет достраивать оценки скоростей ненаблюдаемых колес в случае отказов соответствующих датчиков;

– возможность достраивания оценок значимых переменных задачи сохраняется во всех состояниях измерительной части системы, кроме состояния полной деградации, что позволяет увеличить показатель отказоустойчивости по отношению к нерезервированной системе примерно на 88%;

– уровень ошибок косвенных измерений температур перегрева тормозов не превышает 5%, что позволяет использовать результаты для решения задачи динамической стабилизации температур тормозов в системе реального времени;

– для многофункциональной системы активной безопасности, использующей решения уравнений вращения колес на вираже и уравнений равновесия сил в задачах динамической стабилизации скорости центра масс и идентификации коэффициентов трения скольжения колес, для создания информационного резервирования требуется лишь дополнительная программа достраивания оценок продольных скольжений колес.

Список литературы

1. Бузников С.Е. Современное состояние и перспективы развития автомобильных систем активной безопасности. Труды XV Международной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем» – М.: РГГУ, 2007. – С. 207–211.

2. Бузников С.Е., Шабанов Н.С. Виртуальные датчики нагрева шин и тормозов автомобиля. Ежемесячный научно-технический и производственный журнал «Датчики и системы» № 8 (123), 2009. – С. 21–25.

3. Бузников С.Е., Елкин Д.С. Задача идентификации состояния органов управления автомобиля. Новые информационные технологии в автоматизированных системах: Материалы двенадцатого научно-практического семинара. – МИЭМ, М., 2009. – С. 184–195.

4. Бузников С.Е., Елкин Д.С. Способ предотвращения столкновений автомобиля с препятствиями и система для его осуществления. Патент РФ № 2335805, опубл. 10.10.2008.

5. Бузников С.Е. Виртуальные преобразователи информации интеллектуальных систем активной безопасности автомобиля. Новые информационные технологии в автоматизированных системах: Материалы одиннадцатого научно-практического семинара. – М.: МИЭМ, 2008. С. 126–131.

6. Бузников С.Е., Елкин Д.С. Идентификация максимальных значений коэффициентов трения скольжения колес автомобиля. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2007610818, Роспатент, 2007.

7. Бузников С.Е., Елкин Д.С. Автомобильная система объективного контроля с регистрацией нарушений ПДД. Труды XVI Международной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем». – М.: РГГУ, 2008. – С. 435–439.

8. ISO/PAS 12158:2002 (Road vehicles – Braking systems – Temperature measuring methods).

9. <http://www.fmcsa.dot.gov> – Federal Motor Carrier Vehicle Safety Standard 571.135 “Light vehicle brake systems”, U.S. Department of Transportation, 2005.

Сведения об авторах:

Бузников Сергей Евгеньевич, к.т.н., доцент кафедры «Управление и информатика в технических системах» Московского государственного института электроники и математики, 109028, г. Москва, Б. Трехсвятительский пер., 3; тел. раб. (495) 916 88 49, тел. дом. (495) 675 10 22, e-mail: buznikof@mail.ru.

Елкин Дмитрий Сергеевич, ведущий инженер ОАО «Орион», 115280, Москва, Авиамоторная улица, д. 6, стр. 2, тел. (495) 407-83-48, e-mail: inkaplus@yandex.ru.

Шабанов Николай Сергеевич, аспирант кафедры «Управление и информатика в технических системах» Московского государственного института электроники и математики, 109028, г. Москва, Б. Трехсвятительский пер., 3; тел. моб. (903) 148 47 64, e-mail: nsshah@mail.ru.